

# 形状に依存する前方散乱を考慮した 散乱媒体下での照度差ステレオ法

藤村 友貴<sup>1,a)</sup> 飯山 将晃<sup>2</sup> 橋本 敦史<sup>3</sup> 美濃 導彦<sup>2</sup>

**概要:** 濁った水中や霧、煙などの微粒子が拡散した環境（散乱媒体下）では、観測画像が散乱光によって劣化してしまうため、通常の三次元復元手法を適用することが難しい。この問題に対して、散乱媒体下での照度差ステレオ法が提案されているが、従来の後方散乱のみをモデル化した手法では、前方散乱の影響が大きくなる散乱媒体の濃度が高い環境では精度が低下する。そこで、本研究では前方散乱を考慮した照度差ステレオ法を提案する。カメラで観測される前方散乱成分は物体の形状に依存するため、前方散乱成分の除去と形状の復元を交互に行う。形状に依存した前方散乱はルックアップテーブルを用いて計算し、大規模密行列によってモデル化する。また、計算した大規模密行列をスパースな行列に変換することによって、前方散乱成分の除去を可能にする。実際に散乱媒体下で形状復元を行い、既知物体を用いた定量評価と定性評価により手法の有効性を示す。

**キーワード:** 散乱光, 三次元復元, 照度差ステレオ法

## 1. はじめに

観測した二次元画像からの被写体の三次元形状復元はコンピュータビジョンの分野における重要なテーマである。従来、このような三次元復元手法として様々な手法が提案されてきた。典型的な三次元復元手法としては、特徴点ベースで三角測量の原理により復元を行う Structure from Motion や、物体表面の陰影情報から復元を行う Shape from Shading などが挙げられる。

一方で、濁った水中や霧、煙などの微粒子が拡散した環境（散乱媒体下）における三次元復元は依然として課題となっている。このような環境では、空間中の微粒子に入射した光が散乱させられることによって生じる散乱光によって、観測画像が劣化してしまう（図1）。したがって、通常の方法で用いることを想定された手法では、物体の形状を正しく復元することが難しい。

このような問題に対して、散乱媒体下において照度差ステレオ法を行う手法が提案されている [6] [12] [4]。照度差ステレオ法とは、異なる光源下で撮影された複数枚の画像

を入力として、物体表面の法線ベクトルを復元する手法である [13]。散乱媒体下では図2に示すように粒子に光が入射することで、後方散乱、前方散乱が生じる。したがって、カメラで観測される光は、物体から直接反射してカメラに到達した直接反射成分のほかに、後方散乱成分、前方散乱成分が存在する。Narasimhan ら [6] は、平行光源を仮定したときの散乱媒体下における後方散乱の一次散乱光をモデル化し、非線形最適化により散乱媒体中の物体の法線ベクトルを求める手法を提案している。Tsotsios ら [12] は、光源から照射された光の強度が逆2乗の法則に従うとき、後方散乱成分が比較的短い距離で飽和するという事を利用し、後方散乱成分を除去する手法を提案している。

一方で、これらの手法では散乱媒体下における前方散乱は無視できるものと仮定している。これは、前方散乱は物体の大域的、局所的形状に依存し、直接計算することが困難であるためである。しかしながら、散乱媒体の濃度が高くなると前方散乱の影響が大きくなり、形状復元の精度に影響を及ぼす。Murez ら [4] は前方散乱が生じる環境下での照度差ステレオ法を提案しているものの、この手法では物体の形状が平面に近似できると仮定し、キャリブレーションボードを用いてあらかじめ前方散乱成分を計測している。ゆえに、本来は物体の形状に依存するはずの前方散乱成分を形状が平面であると仮定しているため、復元結果に誤差が生じる。

<sup>1</sup> 京都大学大学院情報学研究科  
Graduate School of Informatics, Kyoto University

<sup>2</sup> 京都大学学術情報メディアセンター  
ACCMS, Kyoto University

<sup>3</sup> 京都大学大学院教育学研究科  
Graduate School of Education, Kyoto University

a) fujimura@mm.media.kyoto-u.ac.jp

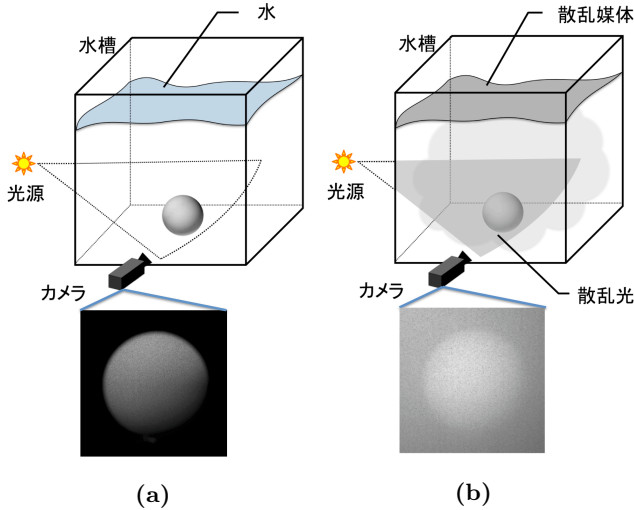


図 1: (a) 水中で撮影された画像. (b) 散乱媒体下で撮影された画像

そこで、本研究では形状に依存する前方散乱成分をモデル化し、それを用いて照度差ステレオ法により形状復元を行う手法を提案する。観測される前方散乱成分は形状に依存するため、鶏と卵の問題が存在する。すなわち、前方散乱成分を計算するためには形状が必要があり、形状を推定するには前方散乱成分を除去する必要がある。したがって、本研究では前方散乱成分の除去と形状の復元を交互に行うアルゴリズムを提案する。

本研究では、形状に依存した前方散乱成分を計算するため、コンピュータグラフィクスにおける知見を利用する。従来、コンピュータグラフィクスでは、三次元空間中の散乱光のシミュレーションにモンテカルロシミュレーションなどが用いられてきた。しかしながら、このような方法は計算時間が膨大であるという問題が存在する。一方で、リアルタイムレンダリングなどの分野では、三次元空間中で生じた散乱光を Closed-form に記述するなど、散乱光を効率的に計算するための方法が研究されている [10] [9] [15]。Sun ら [10] は、等方散乱かつ多重散乱が無視できるという仮定のもと、後方散乱成分と光源-カメラ間で生じた前方散乱成分をルックアップテーブルを用いて記述する手法を提案している。後方散乱成分については、Zhou ら [15] が不均質な散乱媒体について拡張している。また、Pegoraro [9] らは、一般的なフェーズ関数と不均一な強度分布をもつ光源を考慮した場合の Closed-form な解を提案している。本研究でも、Sun ら [10] の手法と同様にルックアップテーブルを用いて計算する。

先ほど述べたように、前方散乱が生じる環境下での照度差ステレオ法として、Murez ら [4] は物体を平面で近似して前方散乱成分の計測を行なう手法を提案している。この手法では、物体を平面で近似することで、物体-カメラ間の前方散乱を点拡がり関数の畳み込みによってモデル化し、

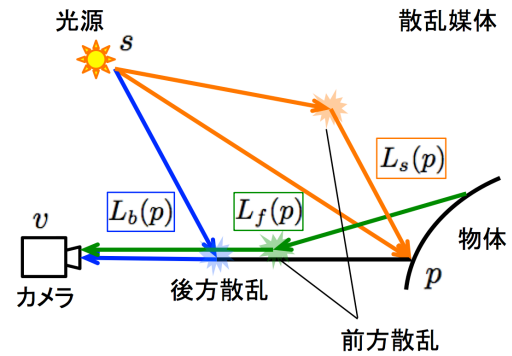


図 2: 散乱媒体下では直接物体から反射する光に加え、後方散乱成分、前方散乱成分が観測される。

この点拡がり関数をあらかじめキャリブレーションボードを用いて推定する。本研究でも、Murez ら [4] と同様、物体-カメラ間の前方散乱は劣化をモデル化したカーネルとの畳み込みによって表現する。一方で、Murez ら [4] の手法とは異なり、本研究は物体の形状に依存した前方散乱をモデル化しているため、カーネルは shift-variant かつ大規模な密行列によって表現される。したがって、観測した画像から直接前方散乱成分を除去することは困難である。そこで、本研究では物体-カメラ間の前方散乱をモデル化した大規模な密行列をスパースな行列で近似する手法を提案し、これを用いて前方散乱成分の除去を行う。

## 2. 散乱媒体下における光のモデル

散乱媒体下での光の散乱をモデル化し、ルックアップテーブルを用いて記述する方法を述べる。本研究では、カメラは透視投影モデル、光源は近接光源、観測する物体表面はランバート拡散反射面とする。なお、多くの先行研究同様 [6] [12] [4] [10] [15] [9]、多重散乱は無視できると仮定する。

散乱媒体下において物体表面上の点  $p$  を観測したとする。このとき、カメラに到達した光  $L(p)$  は、物体表面に到達して反射した光  $L_s(p)$ 、後方散乱成分  $L_b(p)$ 、物体-カメラ間で生じた前方散乱成分  $L_f(p)$  を用いて以下のように記述できる。

$$L(p) = L_s(p)e^{-cd_{vp}} + L_b(p) + L_f(p) \quad (1)$$

ここで、 $c$  は減衰係数、 $d_{vp}$  はカメラと点  $p$  の間の距離である。散乱媒体下では、光は距離に対して指数関数的に減衰する。また、 $c$  は吸収係数  $a$  と散乱係数  $b$  を用いて

$$c = a + b \quad (2)$$

と書ける。

### 2.1 後方散乱成分

図 3 に示すように、後方散乱成分は物体表面上に到達す

ることなく、カメラから物体表面への光路上で散乱した光がカメラに到達した光である。したがって、 $L_b(p)$ はこの光路上で生じた散乱光を積分した形で書くことができ、

$$L_b(p) = \int_0^{d_{vp}} \frac{I_0}{d^2} b\mathcal{P}(\alpha) e^{-c(x+d)} dx \quad (3)$$

となる。ここで、 $I_0$ は光源の放射強度である。 $\mathcal{P}(\alpha)$ はフェーズ関数と呼ばれ、散乱した光の分布を表す。式(3)は解析的に解くことができず、また、数値積分には計算量の問題が存在する。この問題に対して、積分をあらかじめルックアップテーブルとして計算しておくアプローチが考えられるが、式(3)から直接ルックアップテーブルを作成した場合、エントリが $d_{vp}$ と $c$ に加え、光源とカメラの間の距離 $d_{sv}$ と、カメラを中心として光源と物体への方向が為す角 $\gamma$ の四次元となってしまふ。そこで、Sunら[10]はフェーズ関数が等方散乱であることを仮定し、複数回の変数変換を行なったのち、二次元のルックアップテーブルを用いて簡潔に記述する手法を提案した。

$$L_b(p) = I_0 H_0(T_{sv}, \gamma) \left[ F(H_1(T_{sv}, \gamma), \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{T_{vp} - T_{sv} \cos \gamma}{T_{sv} \sin \gamma}) - F(H_1(T_{sv}, \gamma), \frac{\gamma}{2}) \right] \quad (4)$$

ここで、 $H_0(T_{sv}, \gamma)$ 、 $H_1(T_{sv}, \gamma)$ は

$$H_0(T_{sv}, \gamma) = \frac{bce^{-T_{sv} \cos \gamma}}{2\pi T_{sv} \sin \gamma} \quad (5)$$

$$H_1(T_{sv}, \gamma) = T_{sv} \sin \gamma \quad (6)$$

である。また、 $T_{sv} = cd_{sv}$ 、 $T_{vp} = cd_{vp}$ で、以下本稿では $c$ と距離 $d_{xy}$ との積を $T_{xy}$ と表記する。 $F(u, v)$ があらかじめ計算したルックアップテーブルであり、 $F(u, v) = \int_0^v e^{-u \tan \xi} d\xi$ である。本研究では $u$ と $v$ は $0 \leq u \leq 10$ 、 $0 \leq v \leq \pi/2$ で、テーブルのサイズは $64 \times 64$ で作成した。双一次補完を用いることで、比較的小さいサイズのテーブルでも精度良く計算することができる[10]。

Tsiotsiosら[12]は後方散乱成分が比較的短い距離で飽和することを利用し、陽に計算することなく除去する手法を提案した。すなわち、物体が設置された状態と設置されていない状態で画像を撮影し、それらの差分を取ることで後方散乱成分を除去する。本研究でも同様の方法で後方散乱成分 $L_b(p)$ を除去する。

## 2.2 物体表面に到達した光

物体表面に到達した光 $L_s(p)$ は図4に示すように、光源から直接物体表面に到達した光 $L_{s,d}(p)$ と、光源-物体間で前方散乱し物体表面に到達した光 $L_{s,f}(p)$ に分けられる。

$$L_s(p) = L_{s,d}(p) + L_{s,f}(p) \quad (7)$$

物体はランバート拡散反射面であるので、 $L_{s,d}(p)$ は散乱媒体中の減衰を考慮して、

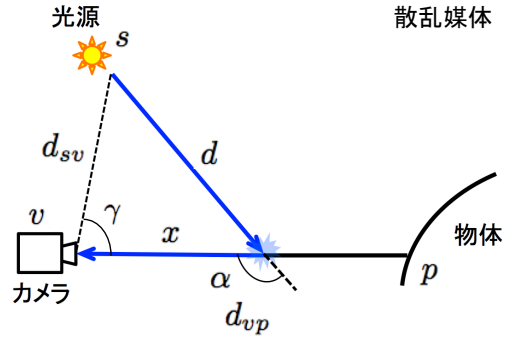


図 3: 後方散乱成分

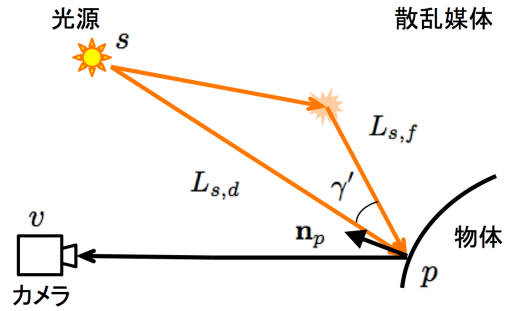


図 4: 物体表面に到達した光

$$L_{s,d}(p) = \frac{I_0}{d_{sp}^2} e^{-T_{sp}} \rho_p (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \quad (8)$$

となる。ここで、 $\rho_p$ は点 $p$ での拡散反射係数、 $\mathbf{n}_p$ は法線ベクトル、 $\mathbf{l}_{sp}$ は $p$ から光源への方向ベクトルである。

光源-物体間で前方散乱し物体表面 $p$ に到達した光は、 $p$ を中心とした半球面上に到達した散乱光を積分した形で書ける。

$$L_{s,f}(p) = \int_{\Omega_{2\pi}} L_b(\omega) \rho_p (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_\omega) d\omega \quad (9)$$

ここで、 $L_b(\omega)$ は $p$ から $\omega$ の方向を観測した後方散乱成分と定義する。前節と同様に、Sunら[10]は二次元のルックアップテーブルを用いることで、

$$L_{s,f}(p) = \frac{bcI_0\rho_p}{2\pi T_{sp}} G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \quad (10)$$

と記述した。ここで、 $G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$ はルックアップテーブルであり、

$$G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) = \int_{\Omega_{2\pi}} \frac{e^{-T_{sp} \cos \gamma'}}{\sin \gamma'} \left[ F(H_1(T_{sp}, \gamma'), \frac{\pi}{2}) - F(H_1(T_{sp}, \gamma'), \frac{\gamma'}{2}) \right] \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_\omega d\omega \quad (11)$$

である。テーブル $G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$ は、 $0 \leq T_{sp} \leq 10$ 、 $-1 \leq \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp} \leq 1$ で、 $64 \times 64$ のサイズで作成した。 $F(u, v)$ 同様、双一次補完により高精度で計算することができる[10]。

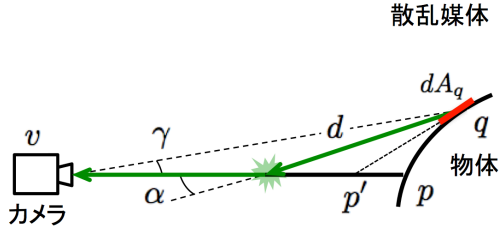


図 5: 物体-カメラ間の前方散乱成分

### 2.3 物体-カメラ間で生じた前方散乱成分

散乱媒体下では、物体表面上のある点  $p$  を観測したとき、物体表面上のそれ以外の点  $q$  で反射した光がカメラと  $p$  を結ぶ光路上で前方散乱を起こすことで観測される (図 5)。本研究ではこの前方散乱成分についてもルックアップテーブルを用いて記述する。

物体表面上の点  $p$  を観測したとき、物体表面上のそれ以外の点  $q$  を中心とした微小領域で反射した光から受ける影響を考える。これは、物体表面上の点  $q$  を中心とした微小領域が光源であると考え、式 (3) と同様の形で書くことができる。

$$\int_0^{d_{vp'}} \frac{L_s(q)dA_q}{d^2} b\mathcal{P}(\alpha)e^{-c(x+d)} dx \quad (12)$$

ここで、 $dA_q$  は  $q$  を中心とした微小領域の面積である。カメラではピクセルに対応する点が離散的に観測される。したがって、物体表面上の点  $p$  以外のすべてのカメラで観測された点を考えると  $L_f(p)$  は、

$$L_f(p) = \sum_{q \neq p} \int_0^{d_{vp'}} \frac{L_s(q)dA_q}{d^2} b\mathcal{P}(\alpha)e^{-c(x+d)} dx \quad (13)$$

と書くことができる。よって、等方散乱を仮定した場合、式 (4) と同様にして、

$$L_f(p) = \sum_{q \neq p} L_s(q)dA_q H_0(T_{vq}, \gamma) \left[ F(H_1(T_{vq}, \gamma), \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{T_{vp'} - T_{vq} \cos \gamma}{T_{vq} \sin \gamma}) - F(H_1(T_{vq}, \gamma), \frac{\gamma}{2}) \right] \quad (14)$$

と書ける。なお、微小領域の面積  $dA_q$  は [7] と同様にして、

$$dA_q = \frac{dI}{\mathbf{v}_q^\top \mathbf{n}_q} \quad (15)$$

と定義する。ここで、 $dI$  はカメラのピクセルの面積、 $\mathbf{v}_q$  は  $q$  からカメラへの方向ベクトルである。

### 3. 前方散乱を考慮した照度差ステレオ法

前章で提案したモデルを用いて、照度差ステレオ法により形状を復元する方法について述べる。

#### 3.1 大規模密行列のスパース行列への近似

先ほど述べたように、後方散乱成分は Tsitsios ら [12]

の手法を用いてあらかじめ除去することができる。ここで、観測から後方散乱成分を除去した画像を  $L'$  とすると、式 (1)、(14) を用いて以下のように書ける。

$$L' = KL_s \quad (16)$$

画像のピクセル数を  $N$  とすると、 $L'$  と  $L_s$  は  $N$  次元ベクトルであり、 $K$  は  $N \times N$  の行列である。行列  $K$  の要素は、

$$K_{pq} = \begin{cases} e^{-T_{vp}} & (p = q) \\ dA_q H_0(T_{vq}, \gamma) \left[ F(H_1(T_{vq}, \gamma), \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{T_{vp'} - T_{vq} \cos \gamma}{T_{vq} \sin \gamma}) \right. \\ \left. - F(H_1(T_{vq}, \gamma), \frac{\gamma}{2}) \right] & (p \neq q) \end{cases} \quad (17)$$

であり、点  $q$  に関する前方散乱が点  $p$  の観測におよぼす影響を表す。したがって、理論的には逆行列を  $K^{-1}$  として  $L_s = K^{-1}L'$  とすることで、物体-カメラ間の前方散乱成分を除去することができる。しかしながら、行列  $K$  は各行ごとの要素が shift-variant であり、かつ大規模な密行列であるため、共役勾配法などを用いても直接計算することができない。

一方で、ある点  $p$  を観測したとき、それ以外の点  $q$  から受ける影響  $K_{pq}$  は、 $p$  と  $q$  の距離がある程度大きくなると非常に小さい値に収束する。図 6 はカメラに対して正対する平面を観測したときに計算される行列  $K$  のある一行を二次元に可視化したものである。図 6 より、観測した点に対してそれ以外の点から受ける影響は、点間の距離が大きくなるにつれて 0 にはならないものの非常に小さい値に収束している。いま、 $p$  の近傍領域を  $S(p)$  とし、 $q \notin S(p)$  での  $K_{pq}$  の収束値が  $\epsilon$  ( $0 < \epsilon \ll 1$ ) であるとする、 $L'(p)$  は

$$L'(p) = \sum_q K_{pq} L_s(q) \approx \sum_{q \in S(p)} K_{pq} L_s(q) + \sum_{q \notin S(p)} \epsilon L_s(q) \quad (18)$$

$$\approx \sum_{q \in S(p)} K_{pq} L_s(q) + \sum_q \epsilon L_s(q) \quad (19)$$

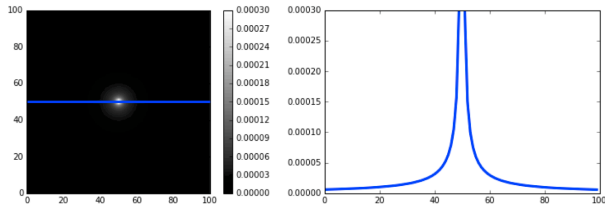
$$= \sum_{q \in S(p)} K_{pq} L_s(q) + C \quad (20)$$

と近似できる。ここで、式 (18) から式 (19) への変形に  $\sum_{q \in S(p)} \epsilon L_s(q) \approx 0$  を用いた。また、 $C = \sum_q \epsilon L_s(q)$  である。したがって、スパースな行列  $\hat{K}$  を

$$\hat{K}_{pq} = \begin{cases} K_{pq} & (q \in S(p)) \\ 0 & (q \notin S(p)) \end{cases} \quad (21)$$

とすると、式 (16) は

$$\begin{bmatrix} L' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & 1 \\ & \hat{K} & \vdots \\ \epsilon & \cdots & \epsilon & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s \\ C \end{bmatrix} \quad (22)$$



(a) (b)

図 6: (a) 平面を観測したときの  $K$  のある一行を可視化した図.  
(b) (a) の青線のプロファイル.

と書くことができる. 右辺の行列はスパース行列となっている. 本研究では, Bi-CGSTAB 法を用いてこの式を解くことにより, 後方散乱成分を除去した画像から物体-カメラ間の前方散乱成分を除去する.

なお, 実験では図 6 より,  $p$  の近傍領域  $S(p)$  は  $p$  を観測した画像上でのピクセルを中心とした  $61 \times 61$  の領域に対応する物体表面上とし, 収束値  $\epsilon$  は,

$$\epsilon = \min_{p,q} \{K_{pq} \mid q \in S(p)\} \quad (23)$$

として計算した.

### 3.2 照度差ステレオ法による法線復元

物体-カメラ間の前方散乱成分を除去したのち, 照度差ステレオ法により法線ベクトルを復元する.

観測した画像から後方散乱成分と物体-カメラ間の前方散乱成分を除去すると, 物体表面で反射した光  $L_s$  が得られる. ここで,  $L_s(p)$  は式 (7), (8), (10) を用いて

$$L_s(p) = \frac{I_0}{d_{sp}^2} e^{-T_{sp}} \rho_p(\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) + \frac{bcI_0\rho_p}{2\pi T_{sp}} G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \quad (24)$$

と書ける.

照度差ステレオ法を適用するため, この式を法線ベクトルについて線形にする. 本研究では以下の近似により行う.

$$G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \approx G(T_{sp}, 1)(\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \quad (25)$$

図 7 に,  $T_{sp} = 2$  であるときの,  $G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$  と  $G(T_{sp}, 1)(\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$  を図示する.  $\arccos(\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$  が大きくなる, すなわち  $\mathbf{n}_p$  と  $\mathbf{l}_{sp}$  の為す角が大きくなるにつれて誤差が大きくなるものの, この近似が有効であることを示している.

このとき, 式 (24) は

$$L_s(p) = \rho_p I_0 \left( \frac{e^{-T_{sp}}}{d_{sp}^2} + \frac{bc}{2\pi T_{sp}} G(T_{sp}, 1) \right) (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp}) \quad (26)$$

となる. よって, この式を用いて照度差ステレオ法を行う.

### 3.3 アルゴリズム

以上に述べた方法を用いて散乱光の除去と法線ベクトル

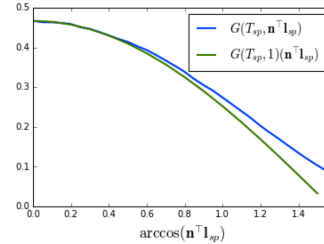


図 7:  $T_{sp} = 2$  のときの  $G(T_{sp}, \mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$  と  $G(T_{sp}, 1)(\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l}_{sp})$ .

の復元を反復計算により行う. なお, 式 (17) のカーネルは物体表面上においてのみ定義されるため, 提案手法はあらかじめ画像中の物体領域をマスクしその領域のみで行う. 後方散乱成分を除去した画像は SN 比の低下により高周波のノイズが含まれており, その結果照度差ステレオ法の出力の法線ベクトルにも高周波のノイズが含まれる. この法線ベクトルから積分して得られた形状を用いてカーネルを計算すると, 式 (15) が原因で大きな誤差が生じてしまうことがわかったため, 本研究では後方散乱成分を除去した画像に対して,  $3 \times 3$  のメディアンフィルタを適用することで, あらかじめ高周波のノイズを除去した. 具体的なアルゴリズムを以下に記述する.

(1) 観測画像とマスク画像を入力.

法線ベクトルと物体の形状の初期化.

(2) 観測画像から後方散乱成分を除去. [12]

得られた画像に  $3 \times 3$  のメディアンフィルタを適用する.

(3) 式 (22) を用いて物体-カメラ間の前方散乱成分を除去.

(4) 式 (26) を用いて法線ベクトルを計算.

(5) 法線ベクトルを積分し形状を復元. 法線ベクトルの積分には Poisson Solver [1] を透視投影モデルに拡張したものをを用いた [8].

復元した形状をもとに法線ベクトルを更新.

(6) 収束するまで 3-5 を繰り返す.

## 4. 実験

実際に物体の三次元形状復元を行い, 提案手法の有効性を検証する.

### 4.1 実験環境

実験環境を図 8 に示す. 実験には 60cm 立方の水槽を用い, 散乱媒体として水と牛乳を加え, その中に復元対象物体を設置する. 散乱媒体の吸収係数と散乱係数については [5] を参照した. カメラは ViewPLUS の Xviii 18bit リニアカメラを用い, 水槽壁面に密着させる. 撮影は露光時間 33ms で 60 回行い, それらを平均したものを入力画像に用いる. 光源は LED をカメラの周りに 8 個設置してあり, したがって提案手法には 8 枚の画像を入力する.

カメラキャリブレーションには Zhang ら [14] の手法を

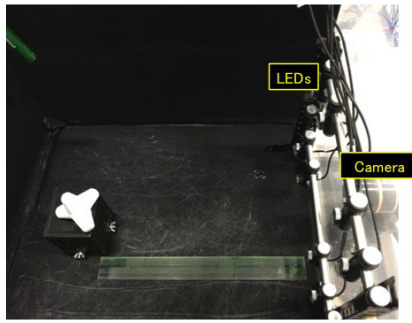


図 8: 実験環境

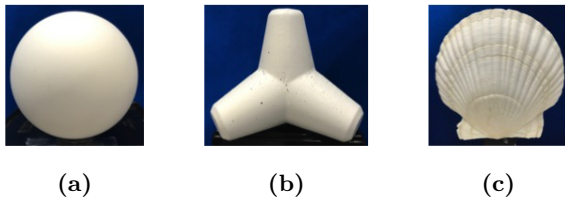


図 9: 復元対象物体. (a) 球, (b) テトラポッド, (c) 貝殻.

用いた. 水槽壁面での屈折を考慮するため, カメラキャリブレーションは水槽に水を入れた状態で行う. LED の位置はあらかじめ手動で計測しておき, 各放射強度  $I_0$  は図 9(a) の球を用いて計算した.

実験で用いる復元対象物体を図 9 に示す (球, テトラポッド, 貝殻).

#### 4.2 実験結果

最初に, 球を用いて定量評価を行う. この実験では, 散乱媒体として水 120L に対して牛乳 30mL を加えた. 入力した画像の一枚は図 1(b) である. 実験結果を図 10 と表 1 に示す. 図 10(a) は Ground truth, (b) は後方散乱成分の除去のみの従来手法 [12], (c) は提案手法であり, 左から右へそれぞれ反復の 1 回目から 4 回目である. 反復の 1 回目では, 球の初期形状として平面を与えた. また, 図 10 の 1 段階目は可視化した法線ベクトル, 2 段階目は得られた法線ベクトルの角度の誤差, 3 段階目は復元した形状である. 図 10 より, 後方散乱成分の除去のみでは前方散乱成分の影響により球の形状が平坦になってしまっている. 一方で, 前方散乱をモデル化した提案手法を適用した場合は, 法線ベクトルの精度が向上しており, 球の形状を復元することができている. 表 1 は得られた法線ベクトルの平均誤差を示したものであり, 反復の 3, 4 回目で誤差が収束していることがわかる.

次に, 球以外の物体について, 復元結果を示す. テトラポッドの復元結果を図 11 に, 貝殻の復元結果を図 12 に示す. それぞれ, (a) 水槽に水のみを加えて通常の照度差ステレオ法を用いた場合の結果と, (b) 水 120L に対して牛乳を 10mL, 20mL, 30mL を加えたときに, 後方散乱のみをモデル化した従来手法 [12] の結果 (2, 3 段階目) と提案手法

表 1: 球の法線復元結果の平均誤差

|        | 従来手法 [12] | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 |
|--------|-----------|------|------|------|------|
| 誤差 (度) | 19.48     | 5.96 | 4.38 | 3.62 | 3.66 |

の結果 (4, 5 段階目) である. また, 各図の 1 段階目は入力した画像の一枚を表している. 図 11, 図 12 より, それぞれ散乱媒体の濃度が高くなるにつれて, 後方散乱のみをモデル化した場合には復元結果が平坦になってしまうことがわかる. 一方で, 提案手法を用いた場合は, 散乱媒体の濃度が高くなっても, 形状の復元が可能であることがわかる.

以上により, 前方散乱が生じる環境における形状復元において, 提案手法が有効性が示された.

#### 5. おわりに

本研究では, 前方散乱を考慮した散乱媒体下での照度差ステレオ法を提案した. 前方散乱は物体の三次元形状に依存するため, 前方散乱の除去と形状の復元を交互に行うアルゴリズムを提案した. 前方散乱成分をルックアップテーブルを用いて計算し, また, 前方散乱をモデル化した大規模行列をスパースな行列に近似することで, 物体-カメラ間の前方散乱成分の除去を可能にした. 実験では, 球を用いた定量評価と定性評価により, 前方散乱が生じる環境でも形状の復元が可能であることを示した.

提案手法の問題点としては, あらかじめ物体領域のマスクが必要であることと, 復元対象物体について初期形状を与える必要があることが挙げられる. 一つ目の問題点に関しては, 著しく汚濁した湖沼などといった環境では, 物体領域のマスク画像を生成することが困難であることが考えられる. 二つ目の問題点に関しては, 媒体から得られた情報を用いて大まかな奥行きを推定するといった解決策が考えられる. 平行光源を仮定した場合は, 後方散乱成分は飽和せずに奥行きの情報を持つ [6]. Treibitz ら [11] は偏光を用いた後方散乱成分の推定と, 得られた後方散乱成分から奥行きを推定する手法を提案している. あるいは, 水中環境においては, Dancu ら [3] が Time-of-Flight の精度を評価しているほか, 赤外光の減衰を利用して物体の奥行きを推定する手法も提案されている [2]. したがって, このような手法を用いることで, 物体の初期形状を推定できる可能性がある.

#### 参考文献

- [1] Agrawal, A., Rasker, R. and Chellappa, R.: What is the Range of Surface Reconstructions from a Gradient Field?, *Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision*, Vol. I, pp. 578-591 (2006).
- [2] Asano, Y., Zheng, Y., Nishino, K. and Sato, I.: Shape from Water: Bispectral Light Absorption for Depth Recovery, *European Conference on Computer Vision*, pp. 635-649 (2016).
- [3] Dancu, A., Fourgeaud, M., Franjic, Z. and Avetisyan,

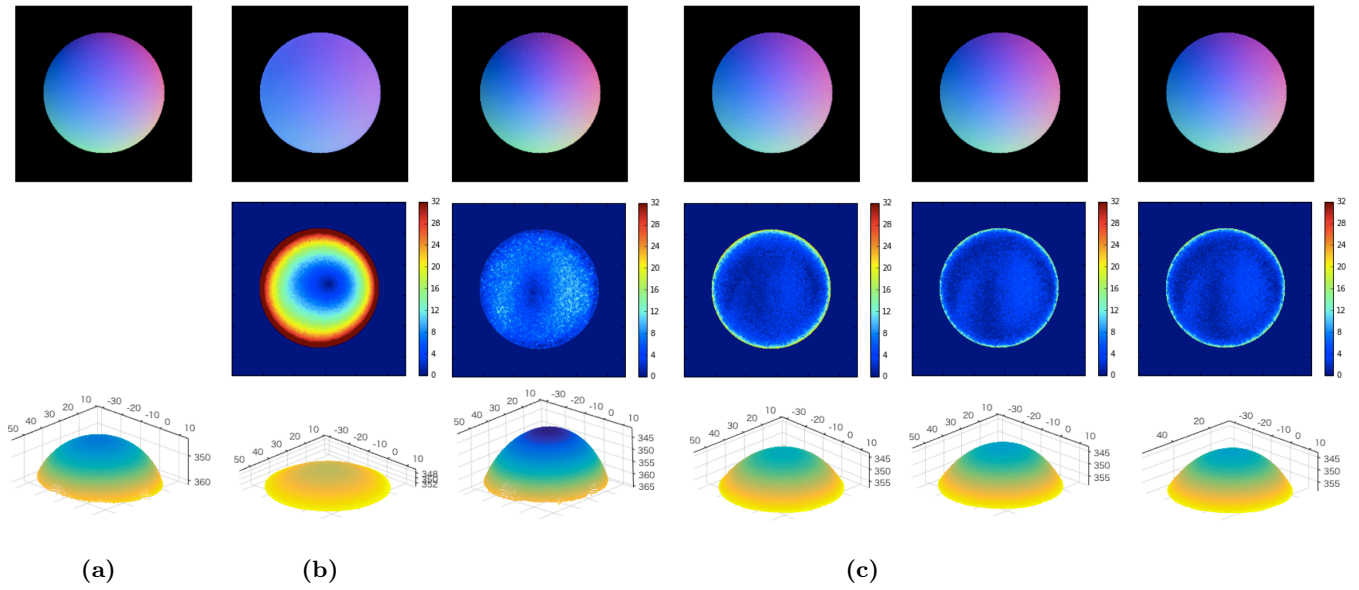


図 10: 球の復元結果. 1 段目は法線ベクトルを可視化したもの, 2 段目は法線ベクトルの角度の誤差, 3 段目は形状を復元したものである. (a) Ground truth. (b) 後方散乱のみをモデル化した従来手法 [12] の結果. (c) 提案手法の反復のそれぞれにおける結果.

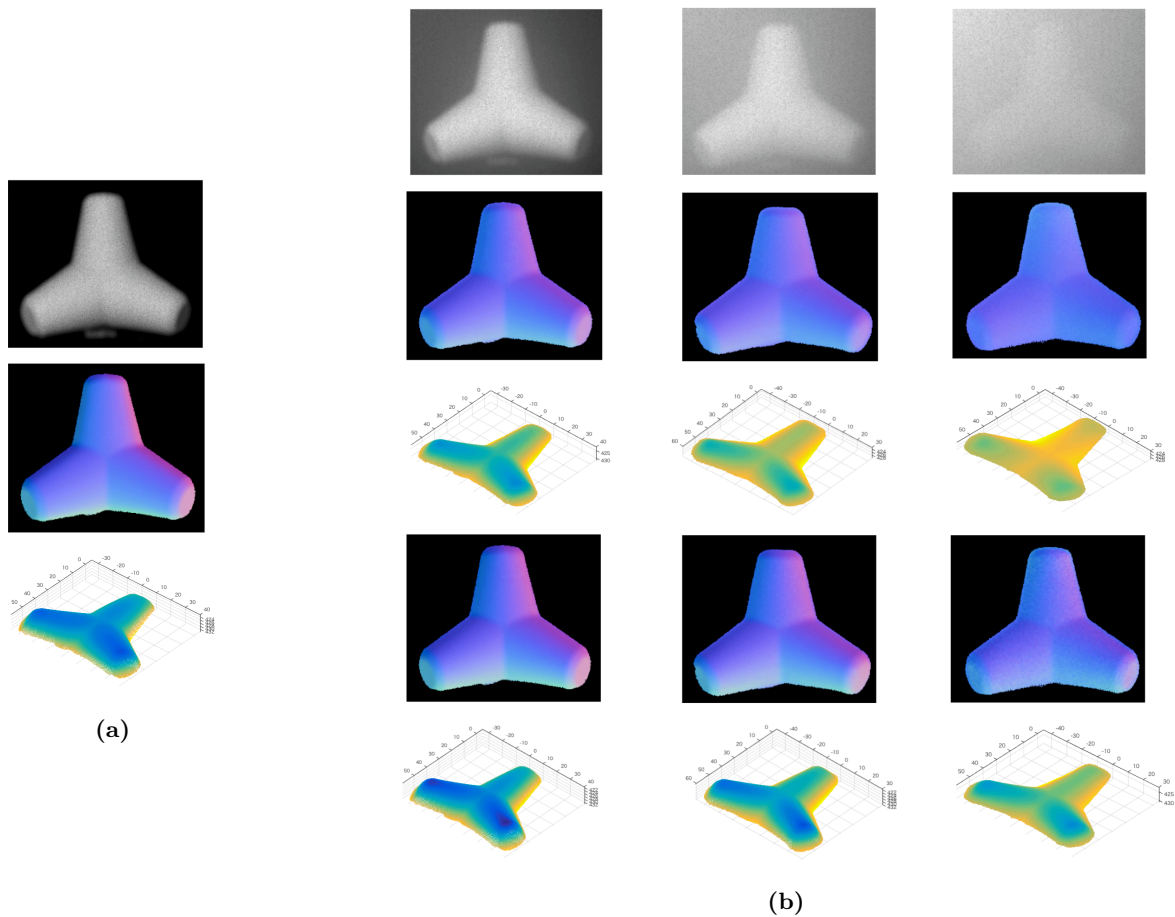


図 11: テトラポッドの復元結果. (a) 水の場合で通常の照度差ステレオ法を用いた場合. (b) 水 120L に対して, 左から牛乳 10mL, 20mL, 30mL を加えたときの, 後方散乱のみをモデル化した従来手法 [12] の結果 (2, 3 段階目) と, 提案手法の結果 (3, 4 段階目)

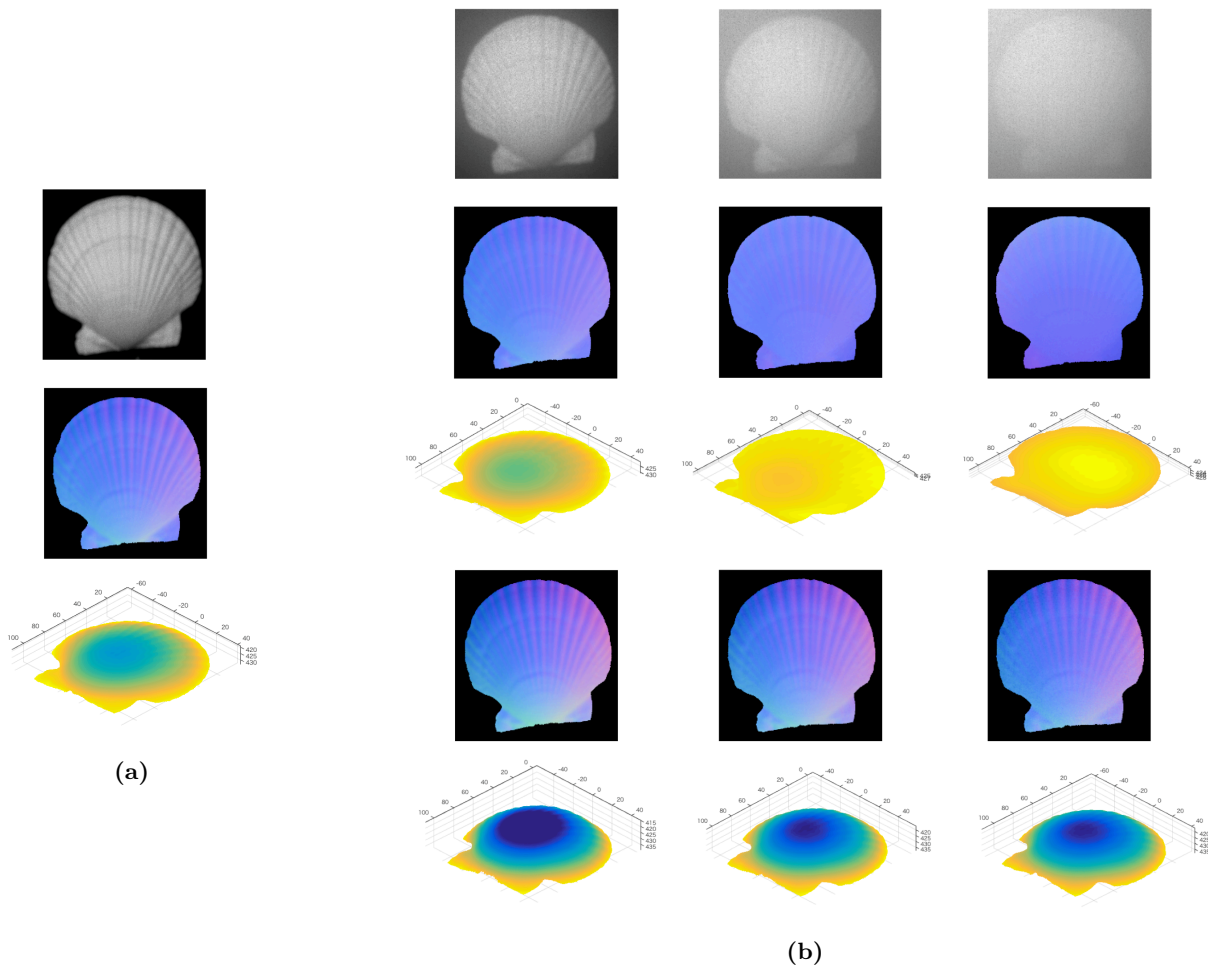


図 12: 貝殻の復元結果. (a) 水の場合で通常の照度差ステレオ法を用いた場合. (b) 水 120L に対して、左から牛乳 10mL, 20mL, 30mL を加えたときの、後方散乱のみをモデル化した従来手法 [12] の結果 (2, 3 段目) と、提案手法の結果 (3, 4 段目)

R.: Underwater reconstruction using depth sensors, *SIG-GRAPH Asia 2014 Technical Briefs* (2014).

[4] Murez, Z., Treibitz, T., Ramamoorthi, R. and Kriegman, D.: Photometric Stereo in a Scattering Medium, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 3415–3423 (2015).

[5] Narasimhan, S. G., Gupta, M., Donner, C., Ramamoorthi, R., Nayar, S. K. and Jensen, H. W.: Acquiring Scattering Properties of Participating Media by Dilution, *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 25, No. 3, pp. 1003–1012 (2006).

[6] Narasimhan, S. G., Nayar, S. K., Sun, B. and Koppal, S. J.: Structured Light in Scattering Media, *Proceedings of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 420–427 (2005).

[7] Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Shape from Interreflection, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 6, No. 3, pp. 173–195 (1991).

[8] Papadhimitri, T. and Favaro, P.: A New Perspective on Uncalibrated Photometric Stereo, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1474–1481 (2013).

[9] Pegoraro, V., Schott, M. and Parker, S. G.: A Closed-Form Solution to Single Scattering for General Phase Functions and Light Distributions, *Proceedings of the 21st Eurographics conference on Rendering*, pp. 1365–1374 (2010).

[10] Sun, B., Ramamoorthi, R., Narasimhan, S. and Nayar, S.: A Practical Analytic Single Scattering Model for Real Time Rendering, *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 1040–1049 (2005).

[11] Treibitz, T. and Schechner, Y. Y.: Active Polarization Descattering, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 31, No. 3, pp. 385–399 (2009).

[12] Tsiotsios, C., Angelopoulou, M. E., Kim, T. and Davison, A. J.: Backscatter Compensated Photometric Stereo with 3 Sources, *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2259–2266 (2014).

[13] Woodham, R. J.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144 (1980).

[14] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334 (2000).

[15] Zhou, K., Hou, Q., Gong, M., Snyder, J., Guo, B. and Shum, H. Y.: Fogshop: Real-Time Design and Rendering of Inhomogeneous, Single-Scattering Media, *15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp. 116–125 (2007).